

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

ГЕНИН Денис Антонович

Выпускная квалификационная работа

Учет 3D эффекта при интерпретации электроразведки ВП с установкой
срединного градиента на примере рудного поля серебряного месторождения Прогноз
(Якутия)

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.01 «Геология»

Основная образовательная программа СВ.5018 «Геология»

Научный руководитель:

к.г.-м.н. доц. Тарасов А. В.

« » 2020

Рецензент:

науч. сотр. Антащук К. М.

« » 2020

Санкт-Петербург

2020

Оглавление

1. Введение.....	3
2. Геологические особенности месторождения Прогноз	5
3. Методические проблемы электроразведки ВП-СГ на месторождения Прогноз и пути их решения.....	13
4. Математический аппарат для построения и решения трехмерной модели	16
5. Моделирование тестовой расстановки ВП-СГ и расчёт прямой задачи	23
6. Инверсия по данным решения прямой задачи. Решение прямой задачи по данным инверсии	28
7. Выводы о применении методики	36
8. Заключение	38
Список литературы.....	39

1. Введение

Применение метода вызванной поляризации является частью среднемасштабной электроразведки на стадиях оценки ресурсов, оконтуривания месторождений и проводится совместно с измерениями кажущегося удельного сопротивления. Применение метода вызванной поляризации в расстановке срединного градиента (ВП-СГ) ускоряет процедуру замеров, позволяет равномерно заполнить планшет данными, а также создает более полную картину значений параметров вызванной поляризации и кажущегося удельного сопротивления по сравнению с другими расстановками. Измерения в методе ВП-СГ проводятся в средней трети расстояния питающих электродов АВ. Данный факт является причиной возникновения некоторых проблем, которые не могут быть решены однозначно в условиях полевого сезона. Анализ карт ВП-СГ месторождения Прогноз позволил обнаружить негладкую невязку, возникающую между планшетами на их перекрытии. Причинами могут быть следующие факторы: малая длина АВ, которая связана со стремлением увеличить сигнал в среде, рельеф, а также сильное влияние неоднородностей в земле, по которой течёт ток. Данная проблема не может быть исправлена во время полевых измерений из-за ограниченности по времени. Из-за невязки планшетов образуется ступенчатая структура, усложняющая геологическую интерпретацию объекта. Данная работа посвящена проблеме возникновения ступенчатых структур и методике их увязки.

Для решения данной проблемы предложена методика увязывания, заключающаяся в компьютерном моделировании тестовой среды с двумя расстановками линии АВ, которая будет образовывать ступенчатую структуру, наподобие той, что наблюдается в природе. Эта ступенчатая структура может быть сглажена созданием искусственной третьей линии АВ, длина которой будет больше настолько, что измерения в ее средней трети будут верным. На основании решения обратной задачи для двух перекрывающихся планшетов будет получена некоторая 3D модель среды. Так как планшеты имеют перекрытие, будет возникать эффект зондирования, что может сделать инверсию на их пересечении более точной. После проведенной инверсии можно произвести решение прямой задачи с мнимым разносом, длина которого больше или равна длине соседних планшетов. Можно ожидать, что после решения прямой задачи для длинного разноса мы получим решение, которое согласуется с физической моделью среды без ступенчатой структуры.

Для реализации предложенного подхода к решению проблемы увязки планшетов ВП-СГ использовалась программа DCIP3D v.5, разработанная в Ванкуверском университете. В данной программе реализована возможность решения 3D прямой и обратной задачи электроразведки по параметрам поляризуемости и удельной электропроводности.

Цель работы: Проверка новой методики преобразования полевых данных, с помощью увязки ступенчатой карты методом компьютерного моделирования.

Задачи:

1. Проведение решения прямой задачи. Составление модели однородного полупространства с включением в него блока с аномальными значениями удельного электрического сопротивления и поляризуемости на границе двух укороченных планшетов,
2. построение карт значений поляризуемости и удельного сопротивления для данной модели.
3. Моделирование карт поляризуемости и удельного сопротивления для этой же модели, но с большим разносом линии АВ. Сравнение графиков значений для двух этих моделей.
4. По полученным данным прямой задачи проведение инверсии для обоих вариантов разноса. Сравнение полученных трехмерных объектов с изначальной моделью.
5. Анализ методики увязки ступенчатой структуры ВП-СГ с помощью построения дополнительного искусственного длинного разноса АВ

Автор выражает благодарности компании “Вирг-Рудгеофизика” и лично Тарасову А.В. за предоставленные материалы по месторождению Прогноз.

2. Геологические особенности месторождения Прогноз

Лицензионная площадь месторождения Прогноз, равная 56 км², расположена в Верхоянском муниципальном округе Республика Саха (Якутия) в 444 км на север от города Якутск, регионального центра с населением приблизительно 300 000 человек, и примерно в 220 км на юго-запад от муниципального центра Батагай с населением приблизительно 3 700 человек. Объект является удаленным с сезонным доступом по зимнику от поселения Батагай. Местность прорезана множеством притоков Лены, самым крупным из которых является р. Сартанг. Месторождение Прогноз расположено в северо-восточной части Якутии, лист Q-53-XIX, XX, в пределах Верхоянской сереброрудной провинции, Дербек-Нельгесинского рудного района и Улах-Чайдахского рудного узла (рис.1) (Тарасов, 2019). Месторождение расположено на водоразделе между крупными реками Сартанг и Нельгесе в верховьях ручья Сытыган – левого притока реки Нельгесе. Рудное поле месторождения Прогноз, а также большинство проявлений и пунктов серебро-полиметаллической минерализации расположены в границах Средне-Нельгесинской серебро-полиметаллической зоны. Отличительной чертой всех серебряных проявлений данного района является преобладание в составе руд полисульфидно-сульфосольного и сульфосольного парагенезисов серебро-полиметаллической формации.

Площадь рудного поля месторождения около 50 км² (рис. 1). В пределах рудного поля выявлено 13 рудных зон, оруденение подтверждено до глубины 250-300 м.

В структурно-геологическом отношении рудное поле месторождения приурочено к своду сложно построенной Арангасчанской антиклинали и находится в

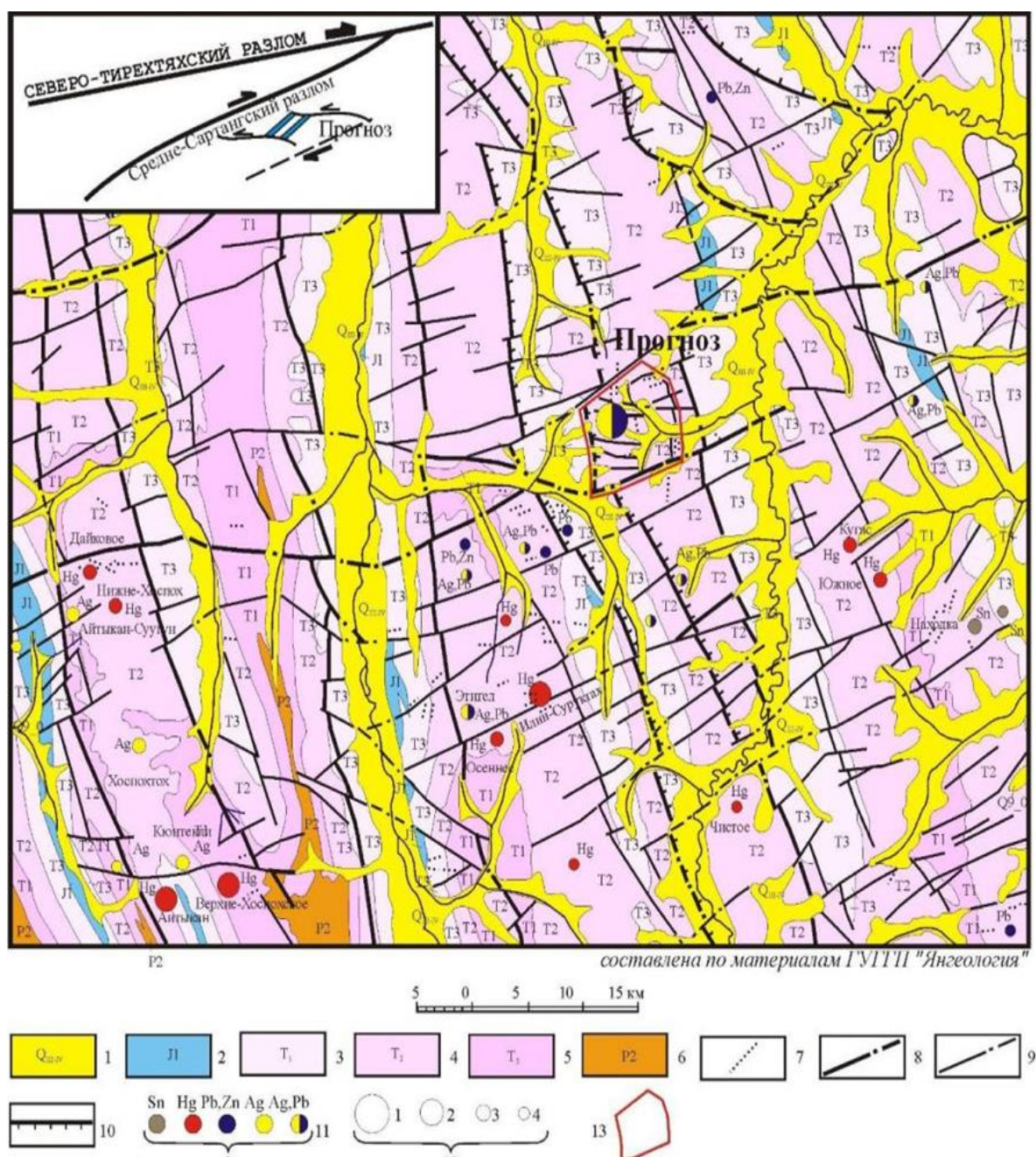


Рисунок 1 Геологическая карта района месторождения Прогноз (Тарасов А. В., 2019)

1- четвертичные отложения аллювиальные и делювиальные; 2 – нижняя юра: алевролиты, аргиллиты, песчаники; 3- верхний триас: песчаники и алевролиты; 4- средний триас: преимущественно песчаники; 5 – нижний триас: алевролиты с прослоями аргиллитов, песчаники; 6 – верхняя пермь: песчаники и алевролиты; 7 – позднеюрские и раннемеловые дайки кислого, среднего и основного состава; 8-10- разрывные нарушения: 8 – главные рудоконтролирующие, 9-второспенные; 10 – взбросо-надвижки; 11 полезные ископаемые: Sn – олово, Hg- ртуть, Pb, Zn – свинец и цинк, Ag- серебро; 12 – месторождения (1) крупное, (2) -малое, (3) -проявления, (4) – пункты минерализации; 13 – рудное поле месторождения Прогноз.

сильнодислоцированном тектоническом блоке на участке сочленения Сартангского

синклиория и Адычанской зоны пологих дислокаций, на участке пересечения продольного субмеридионального Аллах-Нельгесинского разлома и Средне-Сартангской зоны разрывных нарушений северо-восточного простирания (Мусалитин, 2001) (рис. 1, рис. 2). Для Сартангского синклиория характерна линейная складчатость. Восточная часть, относящаяся к Адычанскому складчато-блоковому поднятию сложена широкими сундучными антиклиналями и брахиформными синклиналями. Разграничивает эти структуры продольный Аллах-Нельгесинский разлом, представляющий собой зону взбросо-надвиговых разрывов субмеридионального простирания. Большинство из продольных разрывов – это взбросы, взбросо-сдвиги и взбросо-надвиги со смещениями до 0,5-1,6 км (Тарасов А. В., 2019).

Верхоянский комплекс представляет собой типичные отложения пассивной континентальной окраины, в состав которых входят деформированные обломочные породы карбона, перми, триаса и юры мощностью до 15 км (рис. 1). В западной части они представлены осадками прибрежной аккумулятивной равнины, а к востоку проградируют в глубоководные черные сланцы и турбидиты континентального склона и его подножия (Аникина, 2000).

Позиция рудного поля месторождения Прогноз в общей структуре региона достаточно однозначна: располагаясь на участке пересечения продольного Аллах-Нельгесинского разлома поперечными разрывами Средне-Сартангской зоны, оно приурочено к своду (отчасти к западному крылу) Арангасчанской антиклинали, сложенной существенно песчаниковыми породами среднего триаса. Прогноз располагается в северо-западной части надынтрузивной зоны крупного (40 x 25 км) нескрытого гранодиоритового массива, глубина залегания кровли которого около 2 км (рис. 2). Рассекающая его зона Средне-Сартангского разлома выделяется по гравитационной ступени шириной около 20 км и амплитудой 12-14 мгл. Глубинность разлома, трассируемого этой ступенью, оценивается в 10 км.

Северная часть массива имеет весьма дифференцированное гравитационное поле,

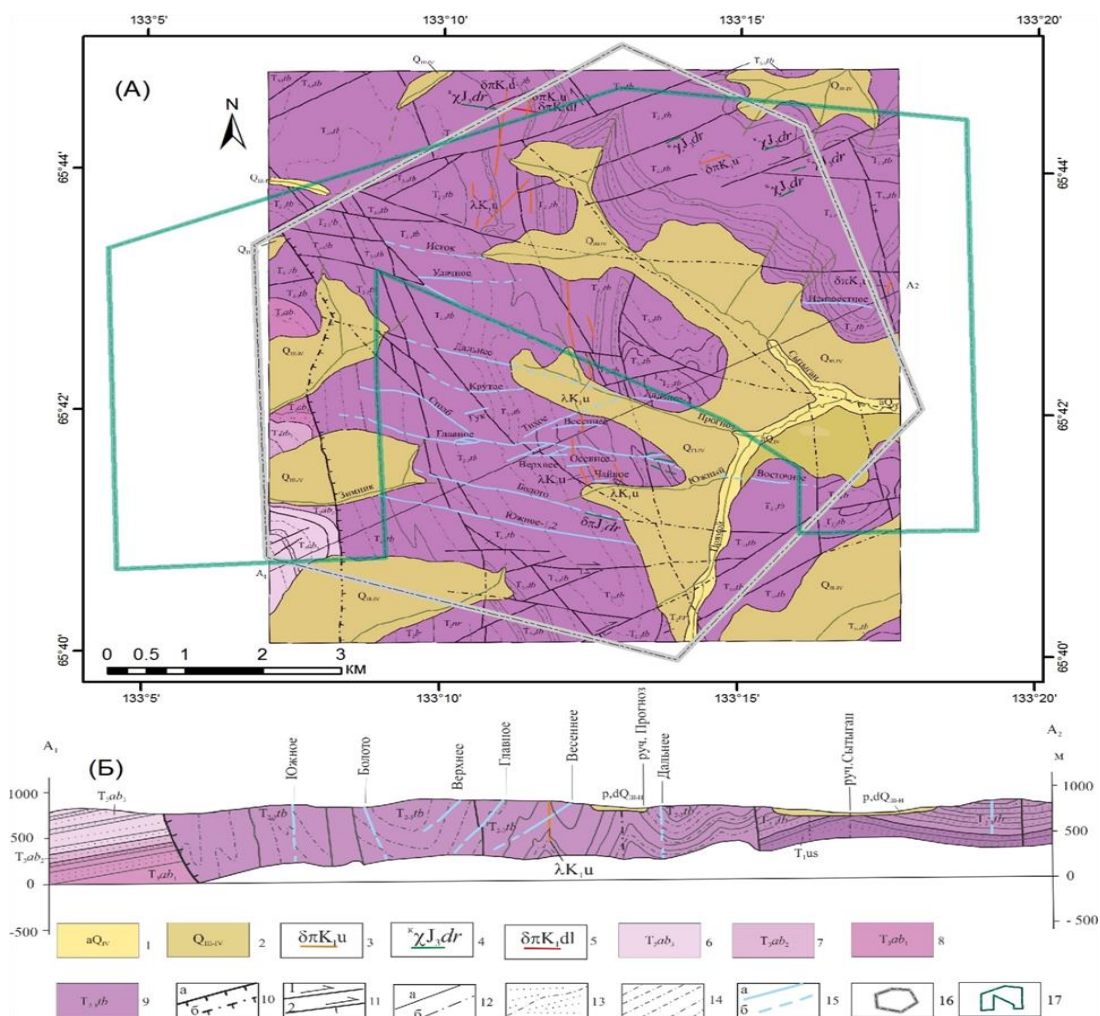


Рисунок 2 Схематическая геологическая карта рудного поля серебряного месторождения Прогноз (Мусалитин, 2001).

(А) – Геологическая карта масштаба 1:50000; (Б) – Геологический разрез по линии А1-А2. 1 - современные аллювиальные отложения: галечники, супеси, илы; 2 - верхнее звено неоплейстоцена-голоцен: делювиальные- и солифлюкционные, пролювиальные и аллювиальные отложения: супеси, суглинки, щебень, галька; 3 - раннемеловые дайки риолитов Улахан-Чайдахского комплекса; 4-5 - позднеюрские дайки Дербекинского комплекса: 4 - керсантиты, 5 - диорит-порфиры; 6-8 - верхний триас абагинская свита: 6 - верхняя подсвита (алевролиты, аргиллиты, песчаники); 7 - средняя подсвита (алевролиты, аргиллиты, пласты песчаников); 8 - нижняя подсвита (песчаники, алевролиты); 9-средний и верхний триас, толбонская свита (песчаники с прослоями алевролитов, линзами конгломератов); 10-12-разрывные нарушения (а-достоверные, б-скрытые под вышележащими образованиями, достоверные); 10-главные (надвиги); 11-прочие разломы (1-сдвиги, 2-взбросы, взбросо-сдвиги); 12-неустановленной морфологии; 13-песчаники с редкими пластами алевролитов; 14 - алевролиты; 15 - серебро-полиметаллические рудные зоны (а - достоверные, б - предполагаемые); 16 – контур рудного поля; 17 – контур поисковых работ 2019 года.ематическая геологическая карта рудного поля месторождения Прогноз (Тарасов, 2019)

в котором картируются три овальных апикальных поднятия его кровли, где глубина залегания гранитоидов может составлять 1 км и менее. Два из них ориентированы в северо-западном направлении, восточное поднятие – в субмеридиональном.

Основные рудовмещающие зоны месторождения располагаются на периферии этих поднятий между слабыми положительными гравитационными аномалиями, интерпретируемыми как поля карбонатизации вмещающих пород. В целом, месторождение Прогноз локализовано как бы в «провисе» кровли невоскрытого гранитоидного массива. Площадь месторождения характеризуется относительно спокойным магнитным полем интенсивностью до 50 нТл. Лишь на его северном фланге по материалам аэромагнитной съемки м-ба 1:200000 (Торопчинов, 1962ф) выделяется локальная аномалия северо-западного простирания интенсивностью до 200 нТл. Ее параметры 14 x 4 км. Аномалия располагается между поднятиями кровли массива и ее природа может быть обусловлена только существенно сульфидным (пирротинным) магнитовозмущающим объектом, находящимся на глубине 0,2-1 км.

С севера и юга рудное поле ограничено системами поперечных разрывов Средне-Сартангского разлома северо-восточного и субширотного простирания. Затухание оруденения за их пределами связано также и с невоскрытыми интрузиями гранитоидов, выделяемых по геофизическим данным.

Все рудные зоны месторождения по отношению к вмещающим породам являются секущими. Основным кинематическим типом рудовмещающих разрывов рудного поля Прогноз являются субширотные (аз. 90-1100) левые сбросо-сдвиги, заложение которых произошло в дорудное время, а обновление в период оруденения. Минерализованные зоны дробления, выполняющие эти разрывы, имеют большую протяженность, вытягиваются на расстояние нескольких километров, подчиняясь генеральному направлению рудовмещающей системы разломов. Однако кулисообразное строение разрывов обусловило наличие участков с резким изменением простирания в зонах сочленения кулис (Тарасов А. В., 2019).

Терригенные породы верхоянского комплекса в районе месторождения представлены песчаниками, алевролитами и аргиллитами среднего триаса, которые претерпели значительные метаморфические изменения зеленосланцевой фации регионального метаморфизма, выразившиеся в пластической деформации обломочной составляющей осадочных пород, в развитии кварцево-регенерационного цемента и в преобразовании первично-глинистого цемента в хлорит-гидрослюдистый с примесью

кварца и железистых минералов. В пределах рудного поля из всех литологических разностей пород доминируют песчаники. Вмещающие осадочные породы и дайки местами интенсивно карбонатизированы, серицитизированы (Аникина, 2000).

Большая часть оруденений косвенно связана с магматогенной активностью региона, приуроченного к раннему и позднему мелу с последующим метасоматическим преобразованием вмещающих терригенных пород. Интрузивные образования представлены малым штоком гранодиоритов в верховьях ручья Арангас и сериями даек гранодиорит-порфиров, диоритовых и кварцевых диоритовых порфиров. Простираие даек от субширотного до субмеридионального, мощность 2-20 м, протяженность до 3-5 км. По химическому составу относятся к известково-щелочной серии. Абсолютный возраст диоритовых порфиров 113-141 млн. лет. Установлено их пересечение позднемеловой дайкой риолитов. Позднемеловые дайки сложены субщелочными диабазами, диоритовыми порфиритами, кварцевыми сиенит-порфирами, биотитовыми камптонитами, риолитами и риодацитами. Простираие даек, в основном, субширотное, протяженность 0,5-2 км, мощность до 5 м. По валовому химическому составу большинство даек относится к щелочно-базальтовой серии, а дайки риолитов – к известково-щелочной. Абсолютный возраст даек: 96-119 млн. лет – для риолитов и 45-70 млн.лет – для субщелочных серий. Дайки дорудные и большая часть их метасоматически изменена (Тарасов А. В., 2019).

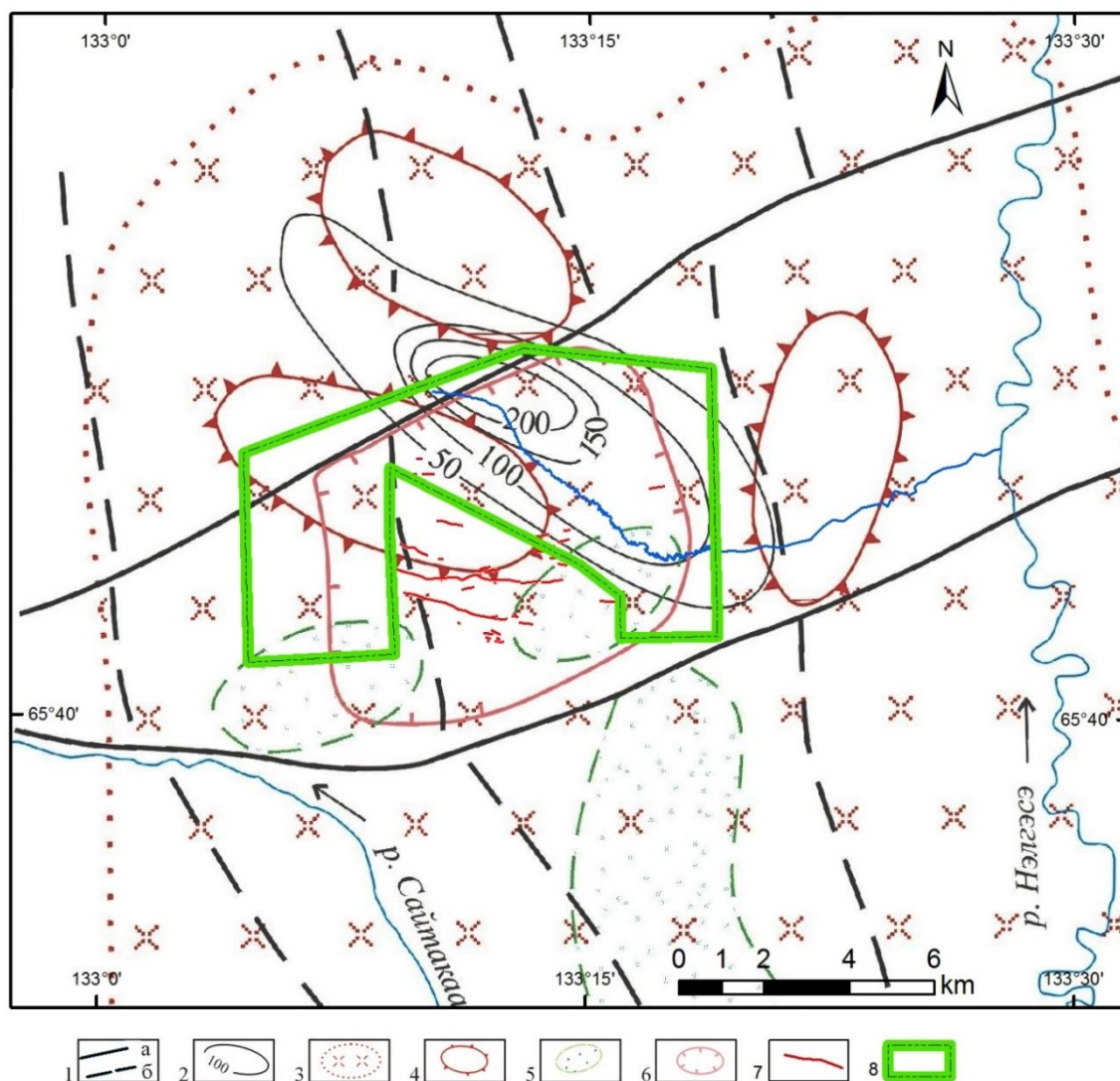


Рисунок 3 Схема глубинного строения междуречья Сайтакан–Негельсе (по Задорожному Н.П., 2000 г.) с элементами интерпретации региональных геофизических полей.

1-основные тектонические швы Средне-Сартагской (а) и Нельгесинской (б) систем разломов; 2- изолинии магнитного поля, нТл по данным аэромагнитной съемки 1:200000 масштаба; 3-5-результаты интерпретации гравиметрии: 3-контур нескрытого массива гранодиоритов(?); 4-апикальные поднятия кровли массива; 5-поля карбонатизации; 6-контур рудного поля Прогноз; 7 – Основные рудные зоны месторождения прогноз 8 – площадь поисковых работ 2019 года (Тарасов А. В., 2019).

По результатам региональных геофизических полей выделяют скрытые возможные магматические образования. Так в границах рудного поля по гравимагнитным материалам (Тарасов А. В., 2019) выделяются два надинтрузивных ореола скрытых гранитоидных массивов (рис. 3).

В 2019 году на участке была проведена электроразведка ВП с установкой срединного градиента с целью поиска новых рудных зон на флангах рудного поля. Ранее (в 2018) было установлено, что известными рудные зоны выделяются слабыми

линейными аномалиями кажущейся поляризуемости. Для увеличения производительности работ было решено использовать установку СГ. Однако в процессе работы возникли сложности с интерпретацией данных СГ-ВП, обусловленные методикой измерений и особенностями геологического строения участка.

3. Методические проблемы электроразведки ВП-СГ на месторождения Прогноз и пути их решения.

Рельеф территории месторождения Прогноз низкогорный с относительными превышениями 300-350 м и абсолютными отметками водоразделов 700-1100 м. Влияние рельефа при расстановке питающих электродов сильно влияет на возможный сигнал при измерениях. Так, если питающие электроды находились у подножия водоразделов, то ток мог пройти вглубь пород, в то время как на водоразделах сигнал ослабляется за счет геометрического эффекта (протекание тока по кратчайшему расстоянию согласно принципу Ферма). Другим важным фактором являлась наличия на многих участках делювиально-коллювиальных отложений, слабо связанных с породами, по которым тек ток, а также слабосцементированных и совершенно неувлажненных. Район месторождения характеризуется сплошным распространением многолетнемерзлых пород мощностью 300-350 и более метров. Сезонное протаивание под моховым покровом достигает 0,2-0,5 м, а на открытых участках 0,8-1,2 м. Многолетнемерзлые породы служили сильным поверхностным изолятором, которые мешали получить отклик от слоёв на глубине нескольких сот метров. Также глубинное влияние на измерение рудного поля могли оказывать скрытые гранитоидные массивы, которые были выделены по гравимагнитным данным.

На участке были выявлены две крупные аномалии кажущейся поляризуемости, обусловленные зонам изменений над апикальной частью скрытых интрузивных массивов (рис. 4, рис. 5). Соответственно размещение питающих электродов вблизи этих аномалий приводило к существенному подъему общего уровня поляризуемости. Кроме того, подошва слоя многолетнемерзлых пород является геоэлектрической границей как по сопротивлению, так и по поляризуемости. Довольно близкое расположение питающих электродов АВ к краям планшетов приводило к возникновению эффекта

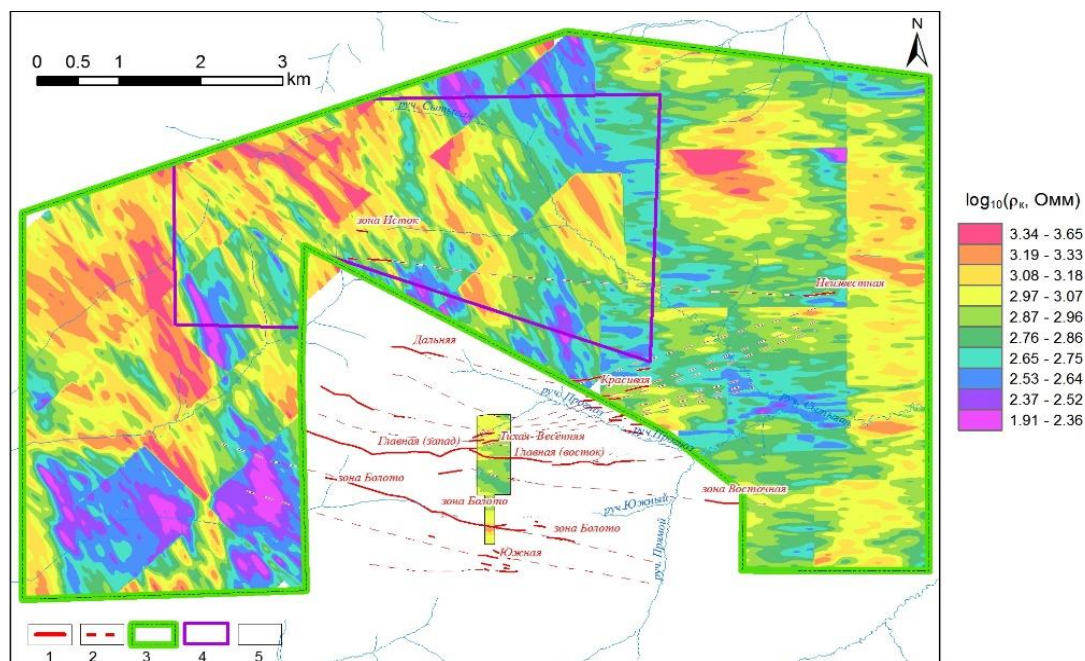


Рисунок 4 Карта полей кажущегося удельного сопротивления на территории измеренного участка месторождения Прогноз. Масштаб представлен в логарифмическом масштабе (Тарасов А. , 2020)

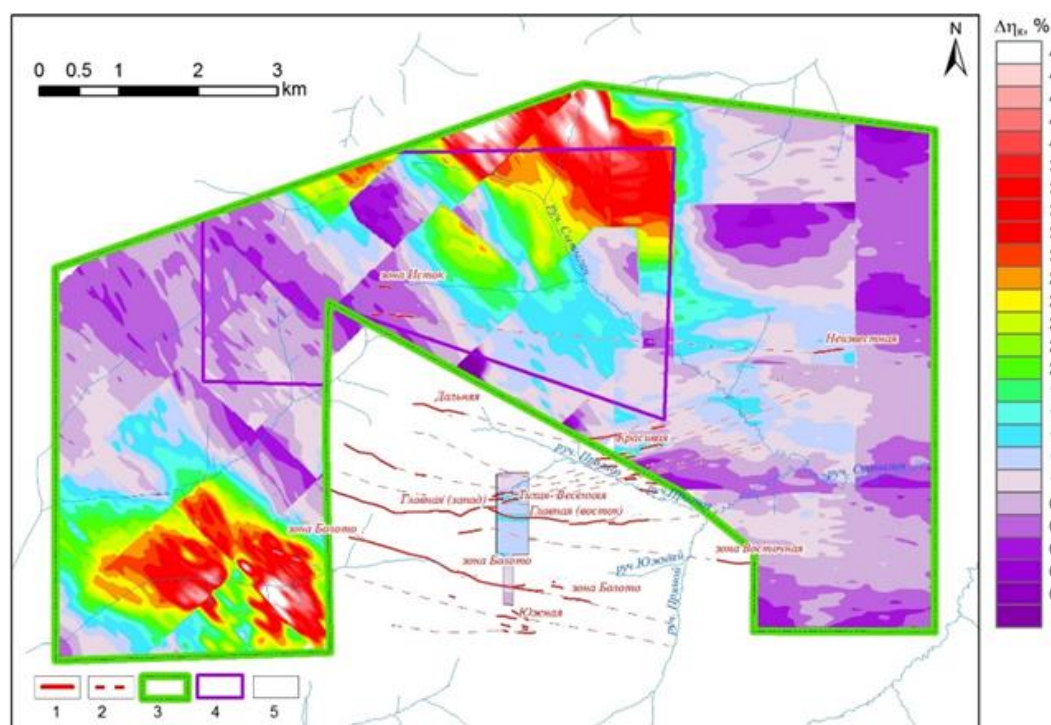


Рисунок 5 Карта полей вызванной поляризации на территории измеренного участка месторождения Прогноз (Тарасов А. , 2020)

зонирования, который проявляется в постепенном уменьшении сопротивления и повышению поляризуемости при движении к центру планшета.

В результате всех этих факторов не удалось получить единые карты геоэлектрических параметров. На границах планшетов наблюдаются скачки уровней

кажущихся сопротивления и поляризуемости и изменения их формы аномалий. Попытка увязки планшетов методами цифровой «сшивки», которые широко используются при обработке данных магнитной съемки, не привели к существенному улучшению читаемости карт.

Для решения этой проблемы было решено использовать формализованные методы компьютерного 3D моделирования электроразведки ВП. С целью построения эффективной геоэлектрической модели, адекватно описывающей наблюдаемые данные сразу по всем планшетам. Построение такой модели позволяет пересчитать наблюдаемые данные на длинную фиктивную линию АВ, которая охватывает всю площадь участка. Расчет кажущихся сопротивления и поляризуемости от такой линии автоматически решает проблему увязки планшетов.

Для демонстрации работоспособности такой методики обработки был проведен численный эксперимент, описанный ниже.

Для 3D моделирования использовался пакет программ DCIP3D (eoas.ubc.ca/, 2020)

4. Математический аппарат для построения и решения трехмерной модели

Программный пакет DCIP3D имеет алгоритм для решения прямой и обратной задачи для трёхмерных моделей поляризуемости η и электропроводности σ .

Для решения прямой задачи важно понимать связь удельного сопротивления, вызванной поляризуемости в зависимости от силы сигнала и физических условий. Параметр вызванной поляризации определяется через уравнение:

$$\eta_k = \frac{\Delta U_{\text{вп}}(\Delta t)}{\Delta U_{\text{пр}}} \quad (1)$$

Это же уравнение можно представить в таком виде:

$$\eta_k = \frac{\phi_s}{\phi_\eta} \quad (2),$$

Уравнение (2) и физический смысл наглядно можно представить в виде измерения изменения сигнала после отключения тока в среде (рис. 6)

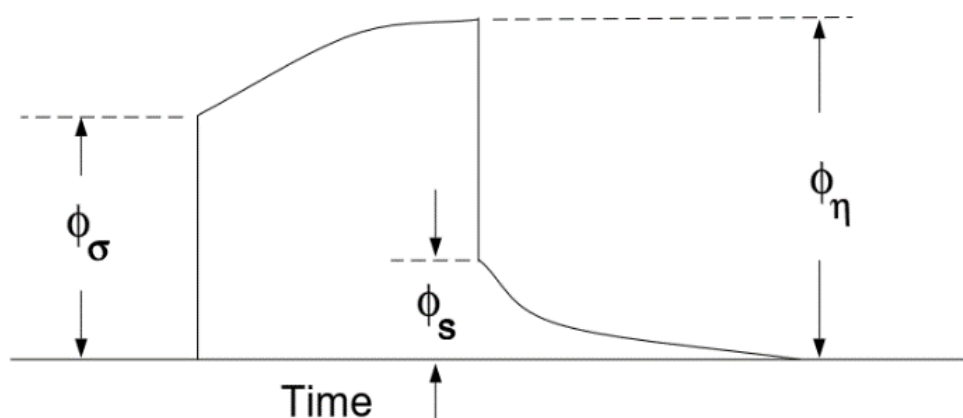


Рисунок 6 Принципиальная схема расчёта вызванной поляризации по изменению сигнала при отключении источника тока

Через некоторое время после включения тока I потенциал достигнет своего предельного значения (ϕ_η). Увеличение потенциала связано с эффектом поляризуемости. Для вычисления ϕ_σ , по формулировке Зигеля, эффект поляризуемости земли моделируется с помощью прямого отображения удельного сопротивления постоянного

тока, но с заменой проводимости σ на $\sigma(1-\eta)$. Получается, что ϕ_σ связано с электропроводностью (величиной, обратной удельному сопротивлению) выражением:

$$\phi_\sigma = F_{dc}[\sigma(1 - \eta)] \quad (3),$$

где:

ϕ_σ – потенциал среды до поляризуемости, В;

F_{dc} – оператор прямой задачи;

σ – электропроводность, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

η – значение поляризуемости в долях единицы

Обе величины меняются как функции положения в трехмерном пространстве. Модель среды делится на ячейки, каждая из которых имеет постоянное значение проводимости и заражаемости.

F_{dc} определяется следующим образом:

$$\nabla(\sigma \nabla \phi_\sigma) = -I\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) \quad (4),$$

где: ∇ – оператор градиента;

σ – электропроводность, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

ϕ_σ – потенциал без эффекта поляризуемости, В;

I – сила входного тока, А;

$(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)$ – расстояние от точки измерений до источника;

Таким образом можно пересчитать вызванную поляризацию через оператора прямого отображения F_{dc} от электропроводности:

$$\eta_k = \frac{F(\sigma_i^*) - F(\sigma_i)}{F(\sigma_i^*)} \quad (5)$$

Данные ВП можно также представить в виде разности потенциалов до и после поляризации среды

$$\phi_s = \phi_\eta - \phi_\sigma \quad (6),$$

По полевым данным, полученным методом ВП-СГ, мы можем произвести интерпретацию и, соответственно, 3D инверсию физических полей. Для инверсии мы должны сделать ряд допущений о свойствах поля, которое рассчитываем, чтобы решение сходилось. Основным математическим методом для инверсии является линеаризация функции, то есть потенциальная возможность для её интегрирования, точнее

суммирования всех ячеек. Эта возможность позволяет приблизиться к первоначальной модели, если предположим, что функция меняется гладко.

Наиболее эффективным методом решения обратных физических задач является метод регуляризации, разработанный А.Н. Тихоновым (Тихонов, 1974). Принцип решения, предложенная Тихоновым, состоит в переформулировке для некорректно поставленных обратных задач таким образом, чтобы решение было непрерывным, что позволяет последовательно приближаться к изначальной модели и уменьшает с каждым разом среднеквадратичное отклонение $\varepsilon > 0$ с поправкой на то, что мы считаем модель гладкой.

Многие годы построение трехмерных моделей методами регуляризации не велось по причинам сложности вычисления огромного массива данных. Например, для месторождения Прогноз количество ячеек было приблизительно 3 млн. Ясно, что для такого объёма требуется огромные оперативные мощности вычисления. Программой DCIP3D был реализован алгоритм для параллельного вычисления множеством ядер оперативной памяти решения трехмерной обратной задачи. При этом метод ВП-СГ решается данной программой медленно из-за подключения ядра в зависимости от числа питающих электродов. В методе же ВП-СГ количество питающих электродов наименьшее из всех возможных измерительных установок.

Программа DCIP3D использует алгоритмы последовательного приближения данных либо при учёте изначальных, введенных автором, либо при построении на основе автоматически посчитанной модели.

Для решения задачи вводятся параметры дискретизации нашего полупространства. С увеличением глубины или отдаленности от места наблюдений шаг дискретизации блоков должен увеличиваться для снижения бокового влияния при

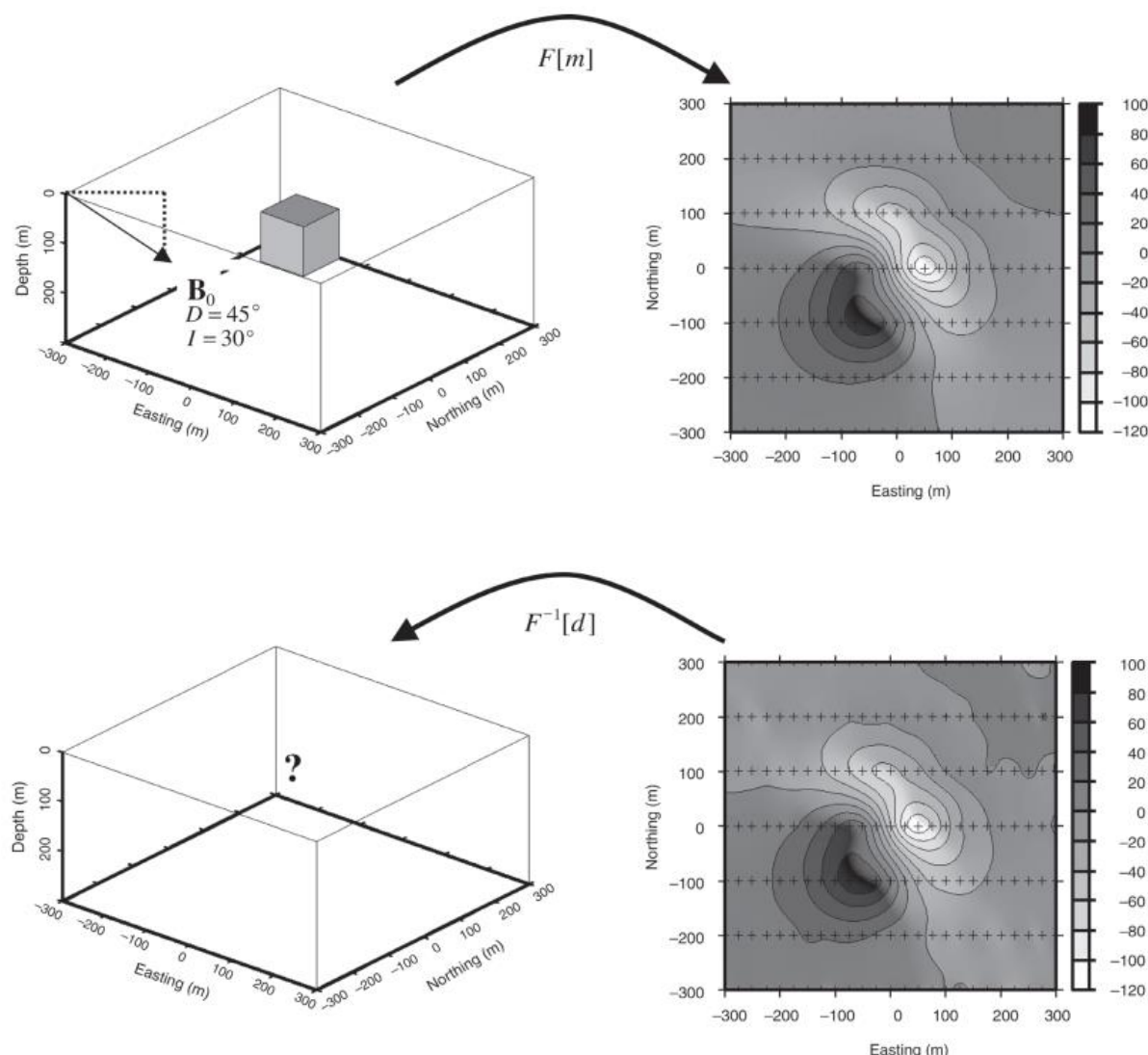


Рисунок 7 Демонстрация решения прямой и обратной задачи геофизики на примере магниторазведки. Наглядно видно, что однозначного положения аномального блока для данного полупространства определить невозможно, так как возможно различие формы и значения параметров блока

инверсии, особенно с учётом того что при полевом анализе участки вне планшета не участвуют в построении карт значений физических полей. Очевидно, что с глубиной точность измерений снижается, а, следовательно, имеет смысл увеличивать высоту блоков для пространств любой метрики.

Для наглядности можно рассмотреть аномальный по намагниченности блок в немагнитной среде, который показан на рис. 7. Прямая задача решается практически единственным образом. Конечное решение будет зависеть от детализации наблюдений.

Инверсионная модель, на основе полученных наблюдений на планшете будет показывать лишь примерное расположения источника, форму, глубину и значение намагниченности объекта на основе полученных карт изолиний намагниченности. Исследователь должен сделать ряд допущений, таких как ориентировка векторов намагниченности источника магнитного поля либо дополнительные данные по скважинам.

Если задать целевую функцию как суммарную по модулю невязку изначальной модели и наблюдаемой, то мы можем представить её через диагональную матрицу, зависящую от матрицы чувствительности. Формула 9 представляет нам это соотношение (Дмитриев, 1990):

$$\phi_d = \sum \left(\frac{d_j^{pre} - d_j^{obs}}{\varepsilon_j} \right)^2 = \|W_d(Gm - d^{obs})\|^2 \quad (7)$$

, где d – наблюдаемые и изначальные параметры ячейки

ϕ_d – целевая функция

ε – среднеквадратичное отклонение

G – матрица чувствительности, задаётся в программе для вычисления ВП.

d – данные, рассчитанные или заданные для модели

W – диагональная матрица

m – столбцы данных

В методе регуляризации функционал невязки (9) дополняется еще одним функционалом модели и минимизируется уже линейная комбинация этих двух функционалов (10)

$$\phi(m) = \phi_d + \beta \phi_m = \|W_d(Gm - d^{obs})\|^2 + \beta \|W_m(m - m_{ref})\| \quad (8)$$

m_{ref} – эталонная модель

$\phi(m)$ – значение в ячейке

β – балансирующий коэффициент

После вводе поправочных коэффициентов, задав область определения для расчёта инверсии по данным наблюдения, мы стремимся приблизить нашу модель к изначальной тестовой. При решении также используется итерационный подход, который состоит в опоре на модель предыдущей итерации и сравнении её значений с изначальными данными. Несколько итераций могут точнее приблизить инверсионную модель к тестовой.

Еще одним существенной особенностью моделирования поля ВП является использование линеаризованного решения прямой задачи для расчета кажущейся поляризуемости. Разность потенциалов с учетом ВП может быть представлена в следующем виде при $\eta \ll 1$

$$\phi_{\eta} = \phi(\sigma - \eta\sigma) = \phi(\sigma) - \sum_{j=1}^M \frac{\delta\phi}{\delta\sigma} \eta_j \sigma_j + H.O.T. \quad (9)$$

Подставляя в формулу (3) выражение (11)

$$\phi_s = - \sum_{j=1}^M \frac{\delta\phi}{\delta\sigma} \eta_j \sigma_j + H.O.T. \quad (10)$$

Данное выражение можно упростить, если отбросить асимптотически малое, относительно главной функции (Oldenburg, 2004):

$$\phi_s = - \sum_{j=1}^M \frac{\delta\phi}{\delta\sigma} \eta_j \sigma_j = - \sum_{j=1}^M \frac{\delta \ln \phi}{\delta \ln \sigma_j} \eta_j \quad (11)$$

Для расчёта поляризуемости из уравнения (11) выражение приобретает следующий облик:

$$\eta_{\alpha} = - \sum_{j=1}^M \frac{\delta \ln \phi}{\delta \ln \sigma} \eta_j \quad (12)$$

Вторичный потенциал или кажущуюся поляризуемость можно представить в виде

$$d_i = \sum_{j=1}^M J_{ij} \eta_j \quad (13),$$

Где J – матрица чувствительности и равна

$$J_{ij} = \frac{\delta\phi}{\delta\ln\sigma}, d = \phi_s \quad (14)$$

$$J_{ij} = \frac{\delta\phi}{\delta\ln\sigma}, d = \eta_\alpha \quad (15)$$

Другим аспектом решения обратной задачи в DCIP3D является вейвлет-преобразование для сжатия матрицы чувствительности. Вейвлет-преобразование является аналогом преобразования Фурье, но который даёт возможность определить время прихода определенного сигнала, а не только разложить сигнал на гармоники. Важной особенностью вейвлет-преобразования является использование L^2 пространства, а не $L^2(0,2\pi)$. Поэтому для интегрирования не подходят гармонические функции, как при преобразовании Фурье. Принципы вейвлет-преобразования используются при вейвлет-сжатии данных. Например, в программе сжатия растровых фотографий существует расширение JPEG, которая использует вейвлет-сжатие, которая отфильтровывает значения цвета фотографии с помощью преобразования матрицы точек изначальной фотографии через представления полусумм и полуразностей соседних точек, таким образом перекодирова код. После перекодировки обратный алгоритм даёт отличную картину от изначальной, однако многократно уменьшает объём данных для обработки и хранения файла. Полусуммы усредняют значения яркости и отфильтровывают локальные всплески значений. Полуразности же устраняют константную составляющую, то есть отфильтровывают низкочастотный сигнал. Схожим образом в программе DCIP3D используется перекодировка при обработке данных, которая уменьшает требуемые для обработки модели оперативные мощности, однако явно искажает данные, что может приводить к растеканию спектра данных при инверсии, что делает инверсированную аномалию часто шире и большего объема в целом, однако с более сглаженными значениями по сравнению с изначальной аномалией блока.

5. Моделирование тестовой расстановки ВП-СГ и расчёт прямой задачи

Для проверки методики изначально была задана трёхмерное однородной полупространство с блоком аномальных значений сопротивления и поляризуемости (рис. 8).

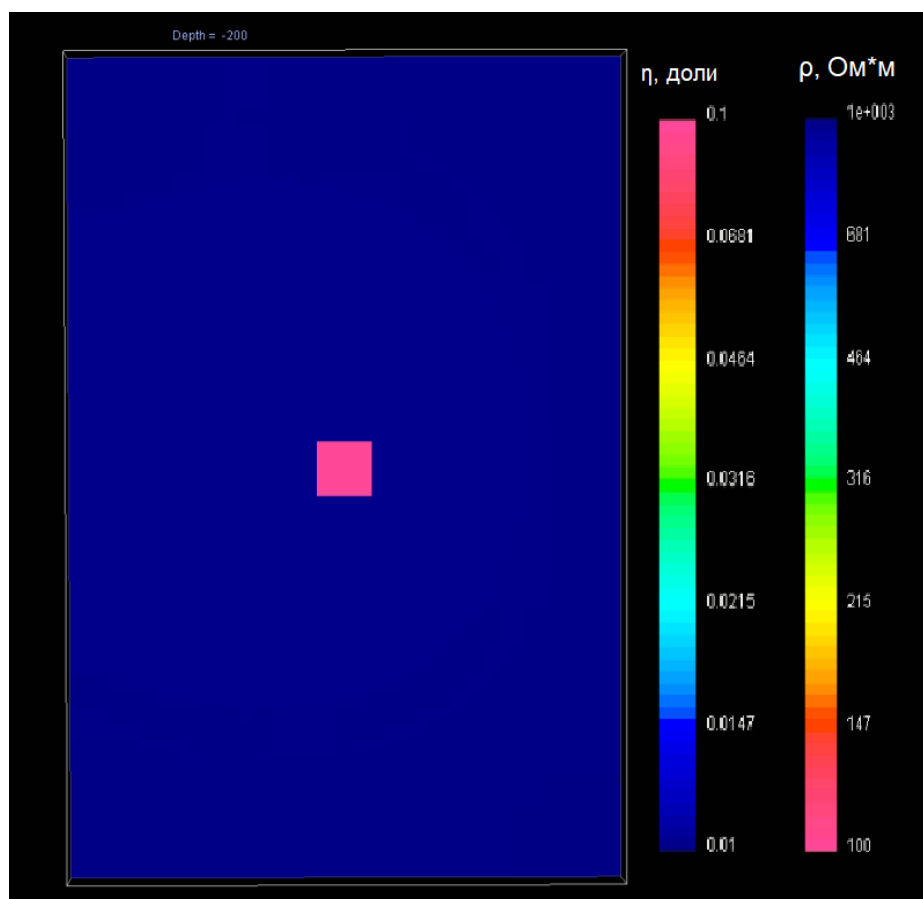


Рисунок 8 Трёхмерная модель среды, вид сверху, срез на глубине 200 м.

Параметры модели:

- Объём модели $4*6*1.5 \text{ км}^3$
- Среда имеет значения электропроводности и поляризуемости 0.001 и 1% соответственно
- Аномальный куб расположен в центре полупространства на глубине 200 м. объёмом $400*400*200 \text{ м}^3$ со значениями электропроводности и поляризуемости 0.01 и 10 % соответственно

Для решения прямой задачи заданы параметры установки для измерения значений поля данной 3D модели (рис. 9).

Параметры расстановки:

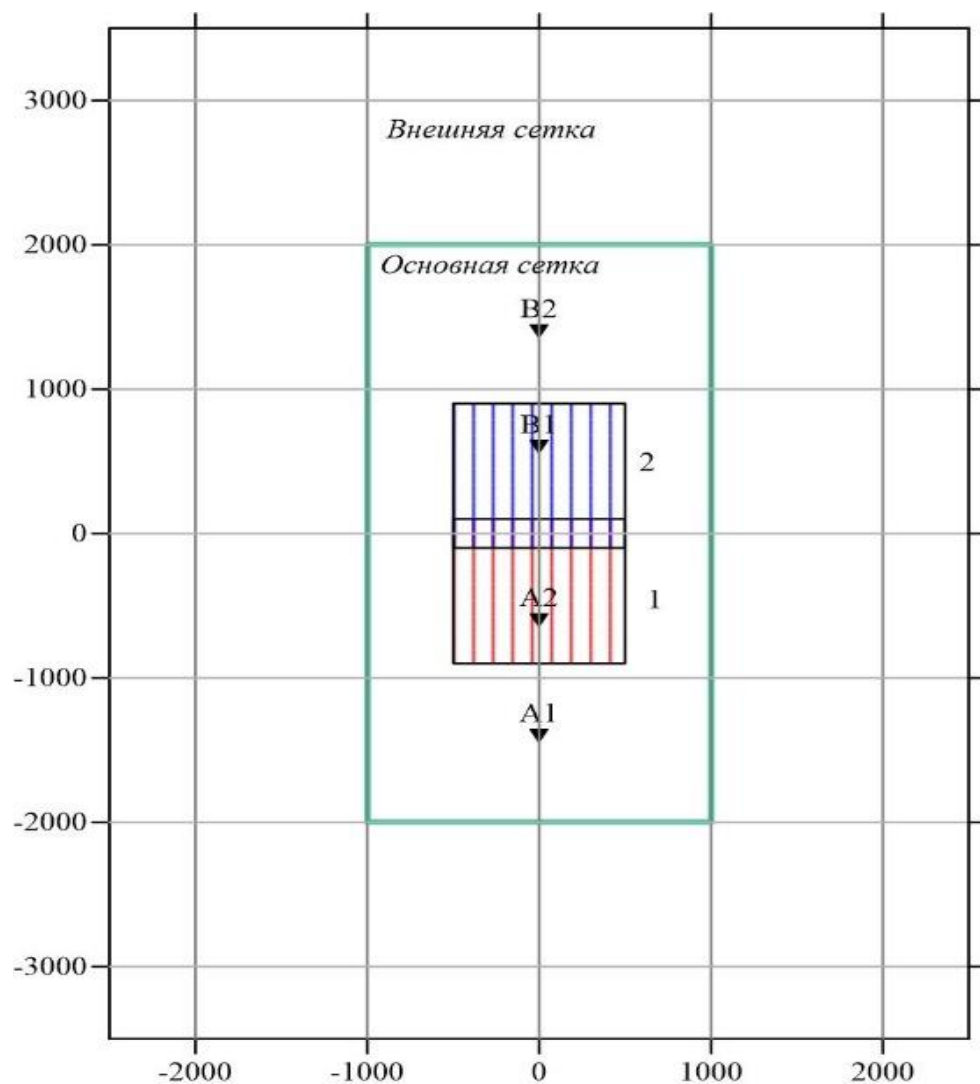


Рисунок 9 Расстановка сети наблюдений для планшетов A1B1, A2B2, A1B2

- Питающие электроды расположены на оси Y
- Длины между электродами A1B1, A2B2 равны 2 км, расстояние A1B2 равно 2.8 км
- Планшеты имеют перекрытие в центре длиной 200 м, что создаёт эффект зондирования при измерениях
- Измерения проводятся с шагом 20 м, длина одной линии наблюдения 1 км
- Расстояние между двумя линиями наблюдения 100 м.
- Количество линий наблюдения 11

Размеры ячеек в пределах основной сетки увеличиваются только с глубиной. С удалением от сетки их размеры увеличиваются и по осям x, y (рис. 10).

```

114 214 56
-2000 -3000 0
500 200 100 80 3*40 100*20 3*40 80 100 200 500
500 200 100 80 3*40 200*20 3*40 80 100 200 500
40*10 5*20 5*40 5*100 300

```

Рисунок 10 Количество и параметры ячеек для трёхмерной модели.

Первая строка описывает количество ячеек в каждой оси. Вторая строка даёт значения нулевой ячейки. Остальные строки описывают изменения размеров ячеек

По результатам решения прямой задачи для начальной модели получены значения поляризуемости и электропроводности между двумя измерительными электродами для установки двумя малыми планшетами с перекрытиями и длинным планшетом. По данным измерения построена карта полей кажущегося сопротивления и поляризуемости в программе Surfer (рис. 11, рис. 12). Как видно из рисунков, для случая измерений двумя планшетами, наименьшие значения сопротивления и наибольшие значения поляризуемости смещены относительно центра, в то время как при измерении длинным планшетом карта изолиний симметрична относительно аномального блока. Также стоит отметить, что, по вышеназванной причине, образуется

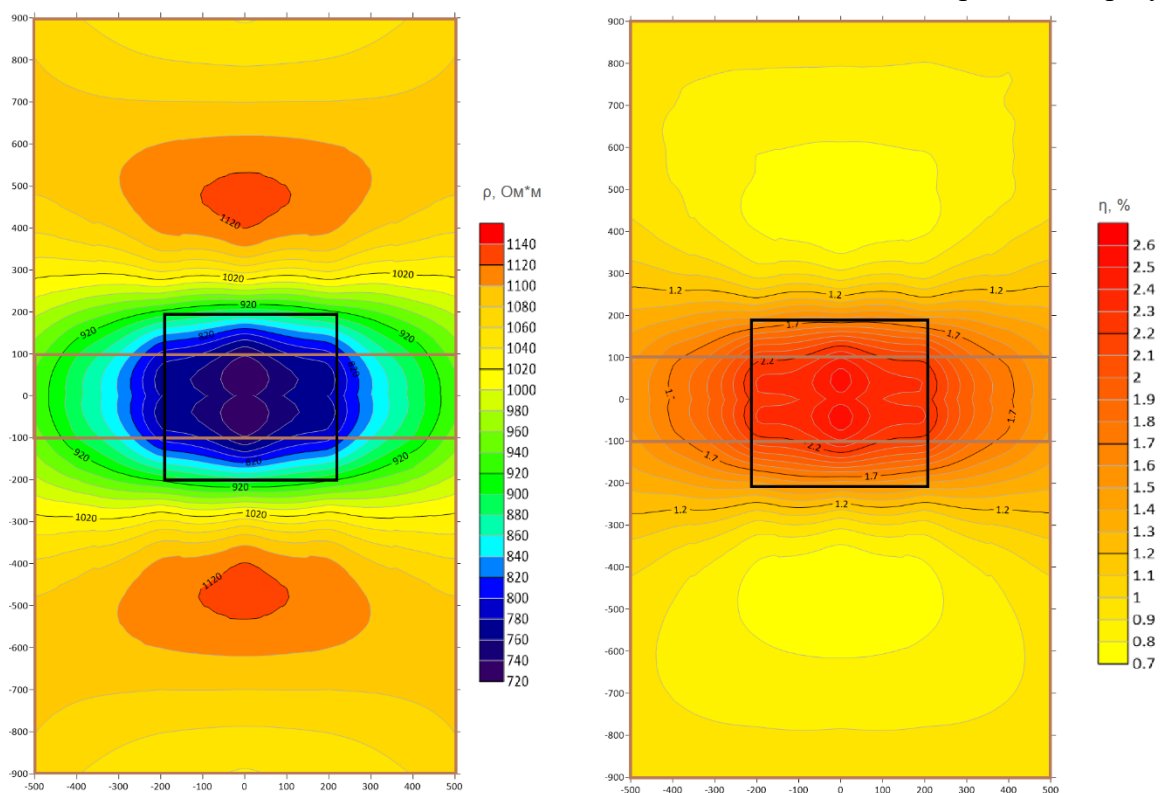


Рисунок 11 Карта полей удельного сопротивления Ом*м и поляризуемости, % для случая двух планшетов с перекрытиями. Черным квадратом обозначена проекция тела

ступень с резким скачком значений поля. Кроме того, так как наши линии наблюдения

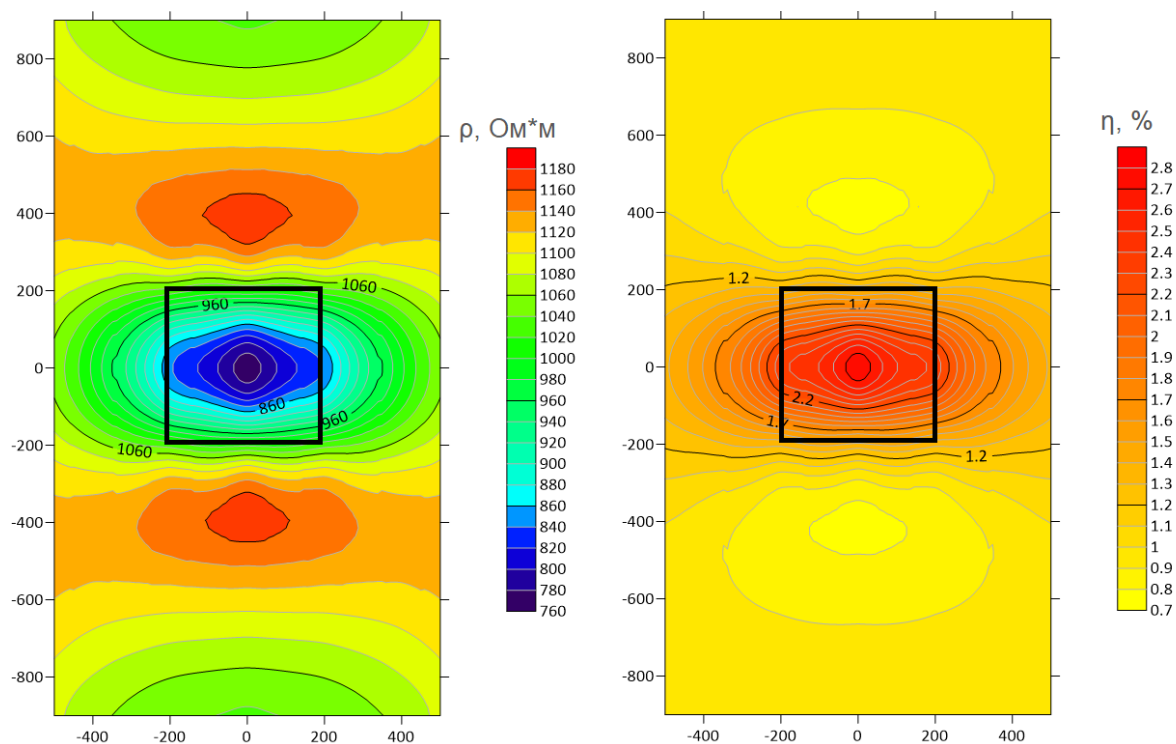


Рисунок 12 Карта полей удельного сопротивления $\text{Ом}\cdot\text{м}$ и поляризуемости, % для случая общего длинного планшета. Черным квадратом обозначена проекция тела

имели только одну направленность, то это привело к растяжению аномалии вдоль оси x .

Для данных расстановок проведены графики значений удельного сопротивления и поляризуемости вдоль центрального профиля (рис. 13, рис. 14)

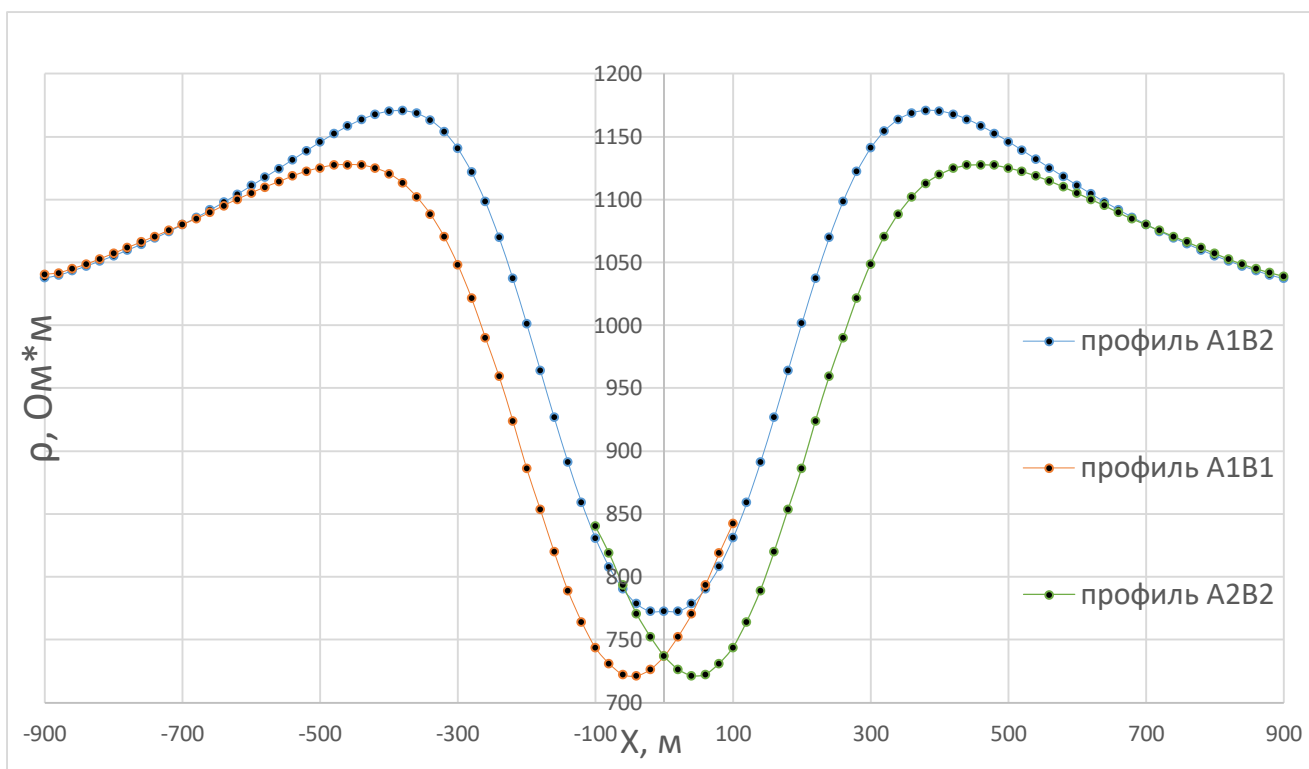


Рисунок 13 График зависимости значений удельного сопротивления для двух планшетов с перекрытиями и для одного длинного планшета

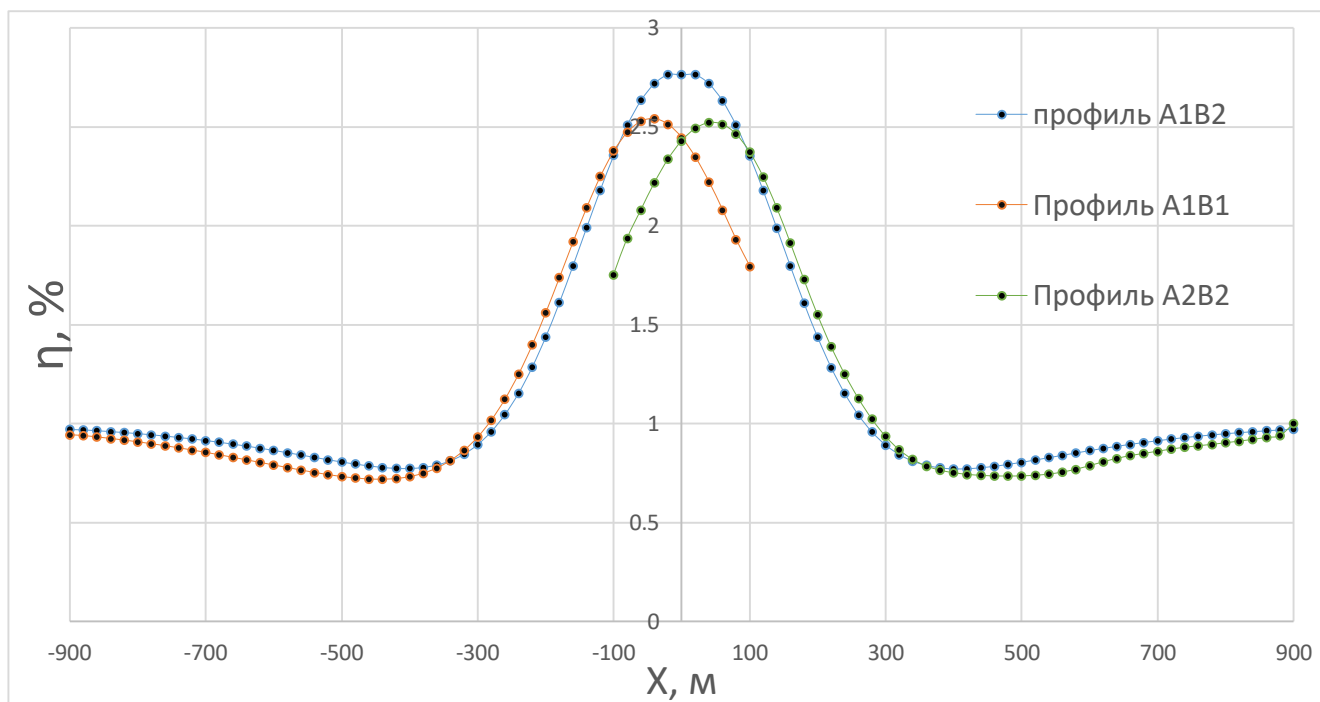


Рисунок 14 График зависимости значений полярзуемости для двух планшетов с перекрытиями и для одного длинного планшета

Как видно из графиков, кажущееся удельное сопротивления и полярзуемость для длинного планшета больше над центром аномалии, чем для двух малых планшетов.

6. Инверсия по данным решения прямой задачи. Решение прямой задачи по данным инверсии

По данным, полученным при решении прямой задачи произведена инверсия для проверки работоспособности методики по увязке ступенчатых структур при полевых измерениях. Для инверсии учитывались параметры референтной модели, степень вейвлет-сжатия, количество активных ячеек для инверсии, весовые коэффициенты для учёта глубины залегания аномалии, вводились параметры α_s α_x α_y α_z , с помощью которых контролировалась близость инверсионной модели к заданной, а также её гладкость. Для расчёта инверсии по данным поляризуемости требовалось также произвести расчёт матрицы чувствительности. Стоит отметить, что в программе используется алгоритм, который при расчёте инверсии поляризуемости также строит и модель сопротивлений по упрощенной формуле перехода (3) и при расчёте исходя из формул (14) и (15).

Для инверсии выбраны следующие параметры:

1. Активными ячейками считались лишь те, по которым производились измерения по планшету, значения остальных ячеек было постоянным и равнялась $0.001 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ для электропроводности и 0.01 для поляризуемости.
2. 6 ячеек последовательно уменьшали вес при расчётах вниз по глубине такое количество раз, чтобы все они были задействованы, чтобы при инверсии не образовывались сильные приповерхностные аномалии
3. α_s α_x α_y α_z были равны 0.001 , 100 , 100 , 100 соответственно

Для расчёта вызванной поляризации и электропроводности потребовалось по 7-10 часов для каждого, что объяснялось связью параллельной обработки данных с количеством пар питающих электродов, что является худшим из возможных для решения ВП-СТ, так как их количество для двух малых планшетов всего лишь равно двум.

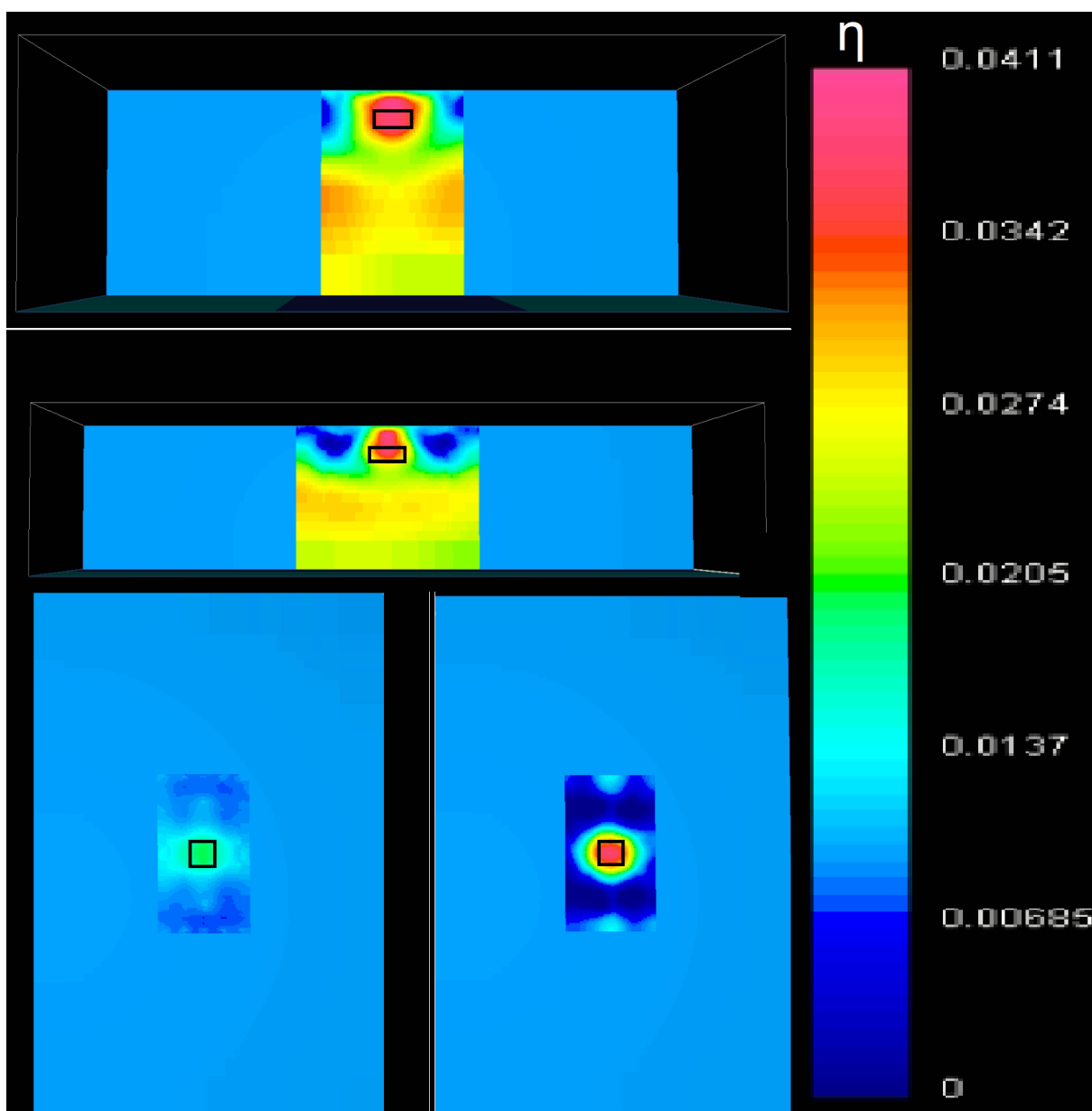


Рисунок 15 Сечения трёхмерной модели после инверсии по поляризуемости. Верхнее сечение через ось x, среднее через ось y. Два нижних плана на глубине 0 и 200 метров

В результате обработки выбраны наиболее приближенные к моделируемой среде варианты инверсии (третий для электропроводности и седьмой для поляризуемости) (рис. 15, рис. 16).

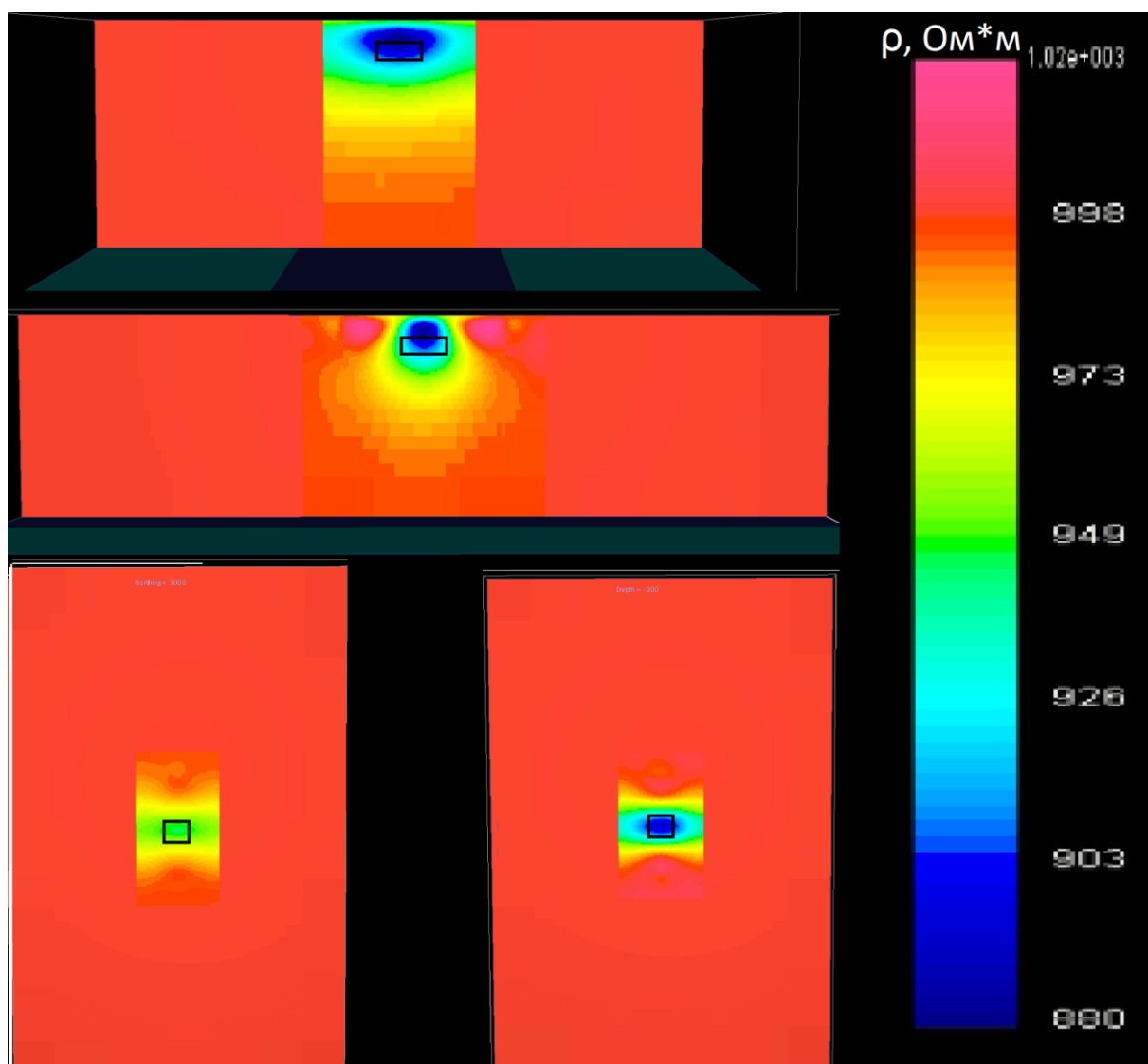


Рисунок 16 Сечения трёхмерной модели после инверсии по удельному сопротивлению. Верхнее сечение через ось x, среднее через ось y. Два нижних плана на глубине 0 и 200 метров

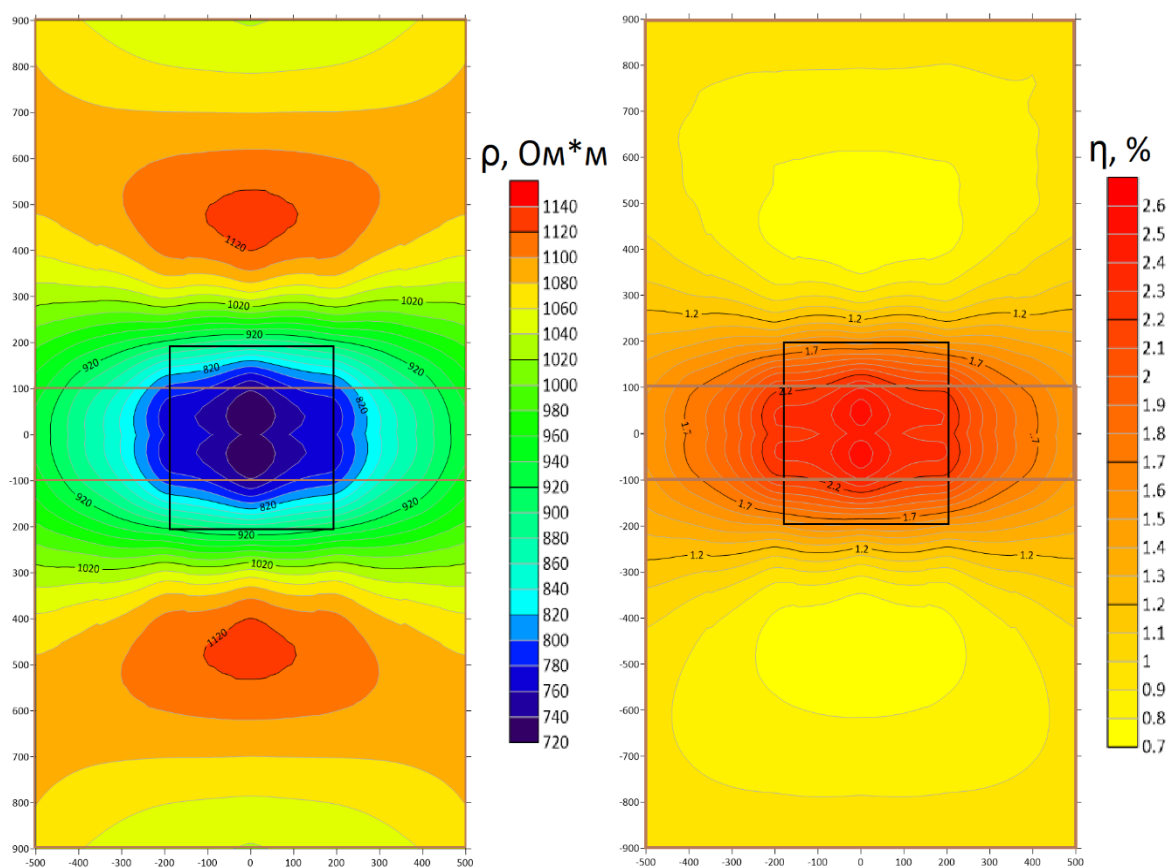


Рисунок 17 Карта полей удельного сопротивления Ом*м и поляризуемости, % для случая двух планшетов с перекрытиями после инверсии. Черным квадратом обозначена проекция тела до инверсии

По данным построенных 3D моделей решены прямые задачи, а также построена карта изолиний для двух и для одного длинных планшетов (рис. 17, рис. 18).

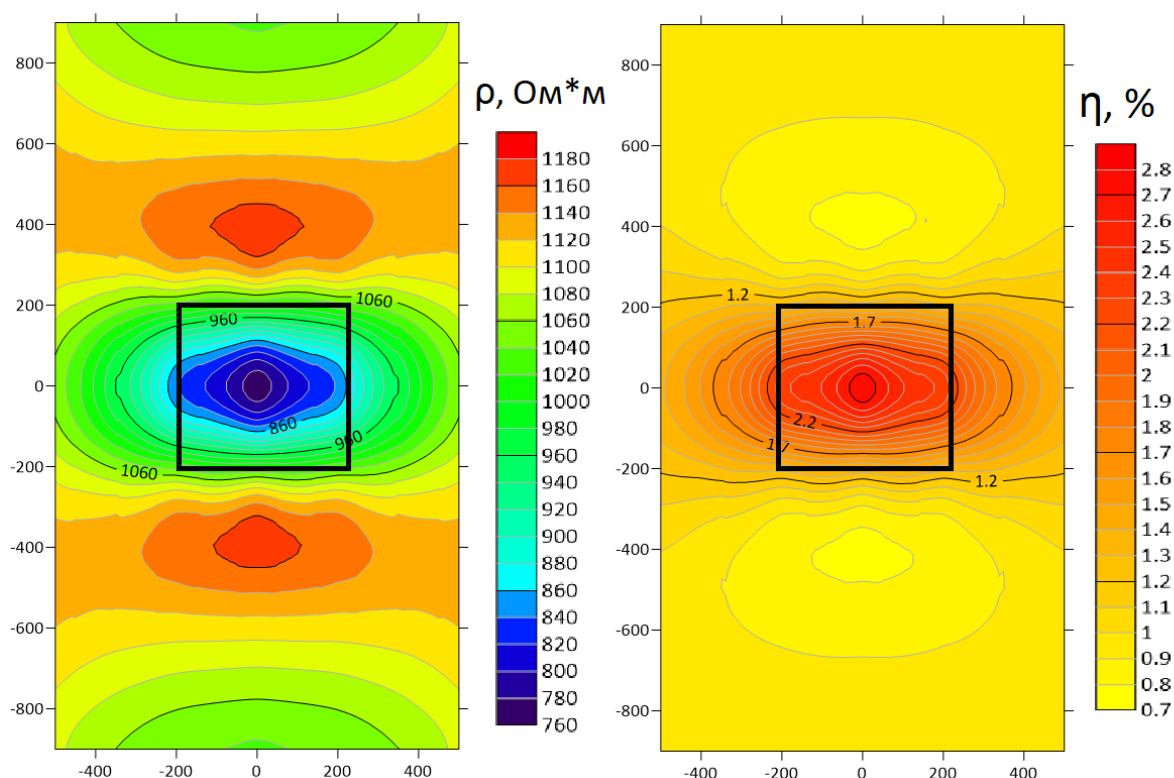


Рисунок 18 Карта полей удельного сопротивления $\Omega \cdot m$ и поляризуемости, % для случая двух планшетов с перекрытиями после инверсии. Черным квадратом обозначена проекция тела до инверсии

Для данных карт проведены графики значений сопротивления и поляризуемости через центральный профиль наблюдений и включен график для данных значений для длинного планшета до инверсии (рис 19, рис. 20).

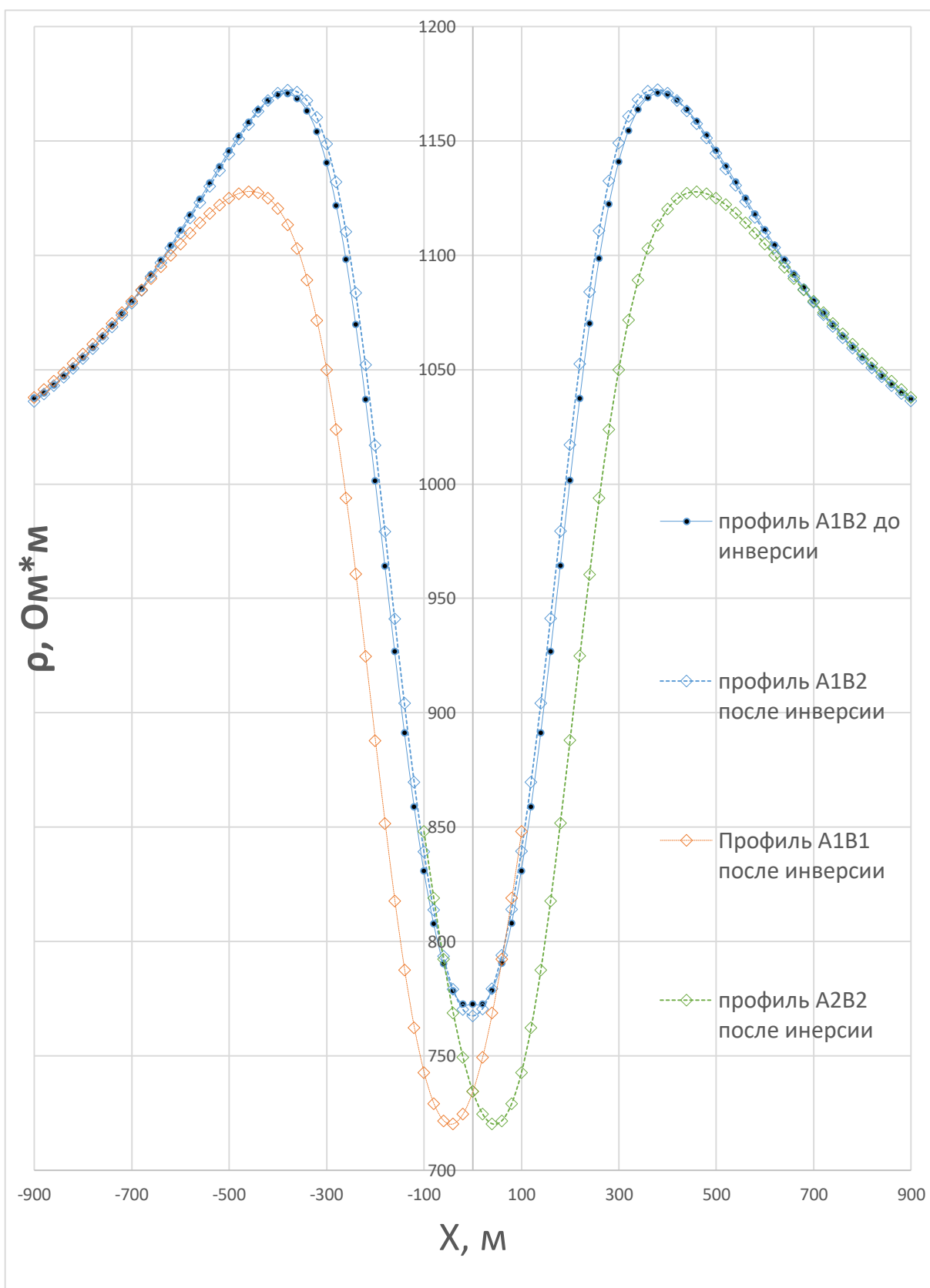


Рисунок 19 График зависимости значений удельного сопротивления для двух планшетов с перекрытиями и для одного длинного планшета после инверсии трёхмерной модели

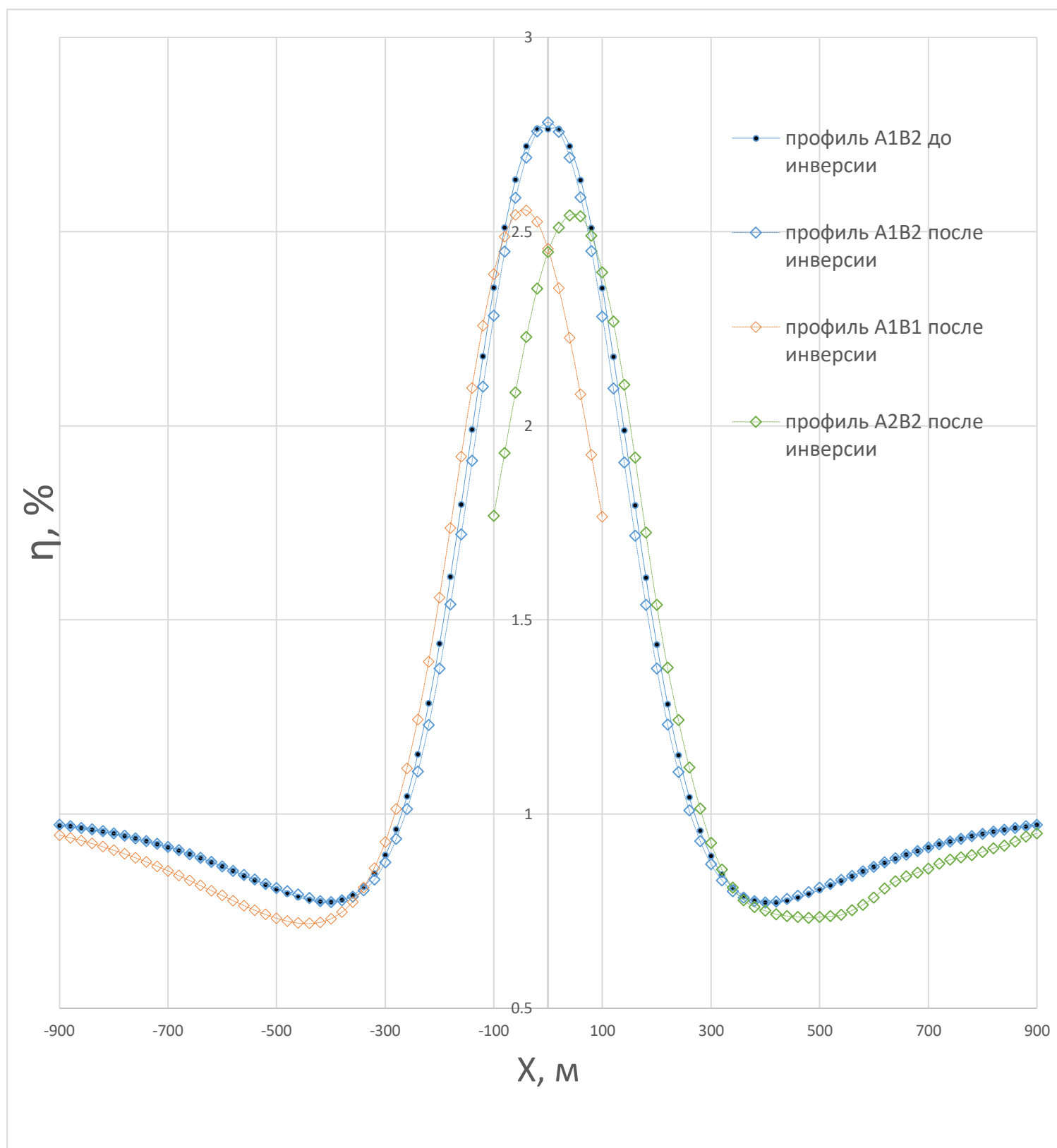


Рисунок 20 График зависимости значений поляризуемости для двух планшетов с перекрытиями и для одного длинного планшета после инверсии трёхмерной модели

Данные графики практически идентичны модельным (рис.13, рис. 14), настолько, что при сравнении их с графиками от изначальной модели наблюдается наложение, что сильно усложняет восприятие. Это особенно заметно на графиках значений для длинного планшета до и после инверсии. Тем не менее, различия в значениях имеются и это связано с неоднозначностью решения обратной задачи и неточностями инверсионной модели как следствие этого.

Близость полученных данных подтверждает, что полученная нами инверсионная 3D модель является допустимой и что результаты инверсии и пересчёт прямой задачи на длинный планшет позволит нивелировать невязки с определенными изменениями кажущихся удельного сопротивления и поляризуемости.

7. Выводы о применении методики

Методика была проверена на возможность устранения невязок в тестовом режиме и может быть применена на практике для увязки при площадных работах ВП-СГ.

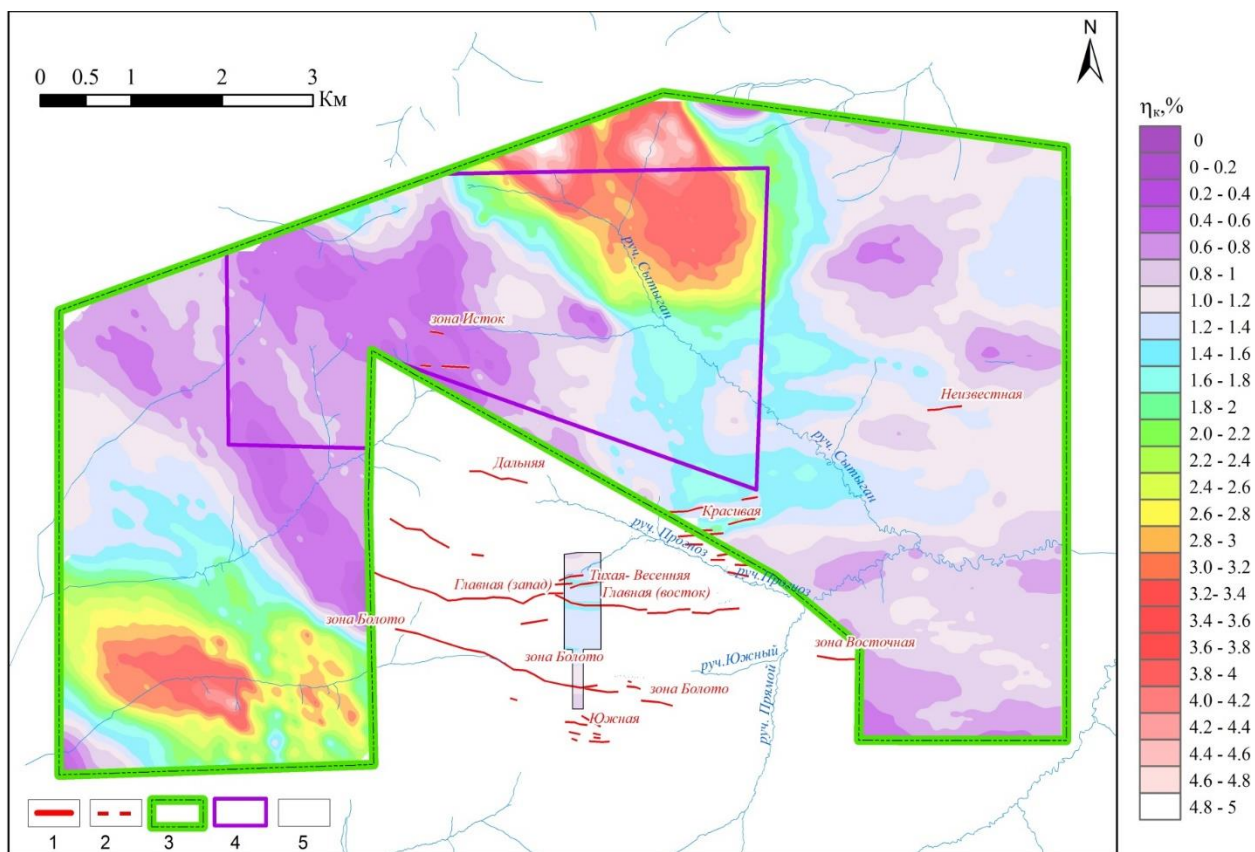


Рисунок 21 Сводная карта изолиний кажущейся поляризуемости (η_k) по данным съемки СГ-ВП после межпланшетной увязки.

По документам, полученным от компании “ВИРГ-Рудгеофизика” данная методика устранения невязки с помощью построения трёхмерной модели с учётом рельефа была применена. Полученные карты полей дали возможность более однозначно интерпретировать геологическую картину для данного рудного поля (рис 21, рис. 22) (Тарасов А. , 2020).

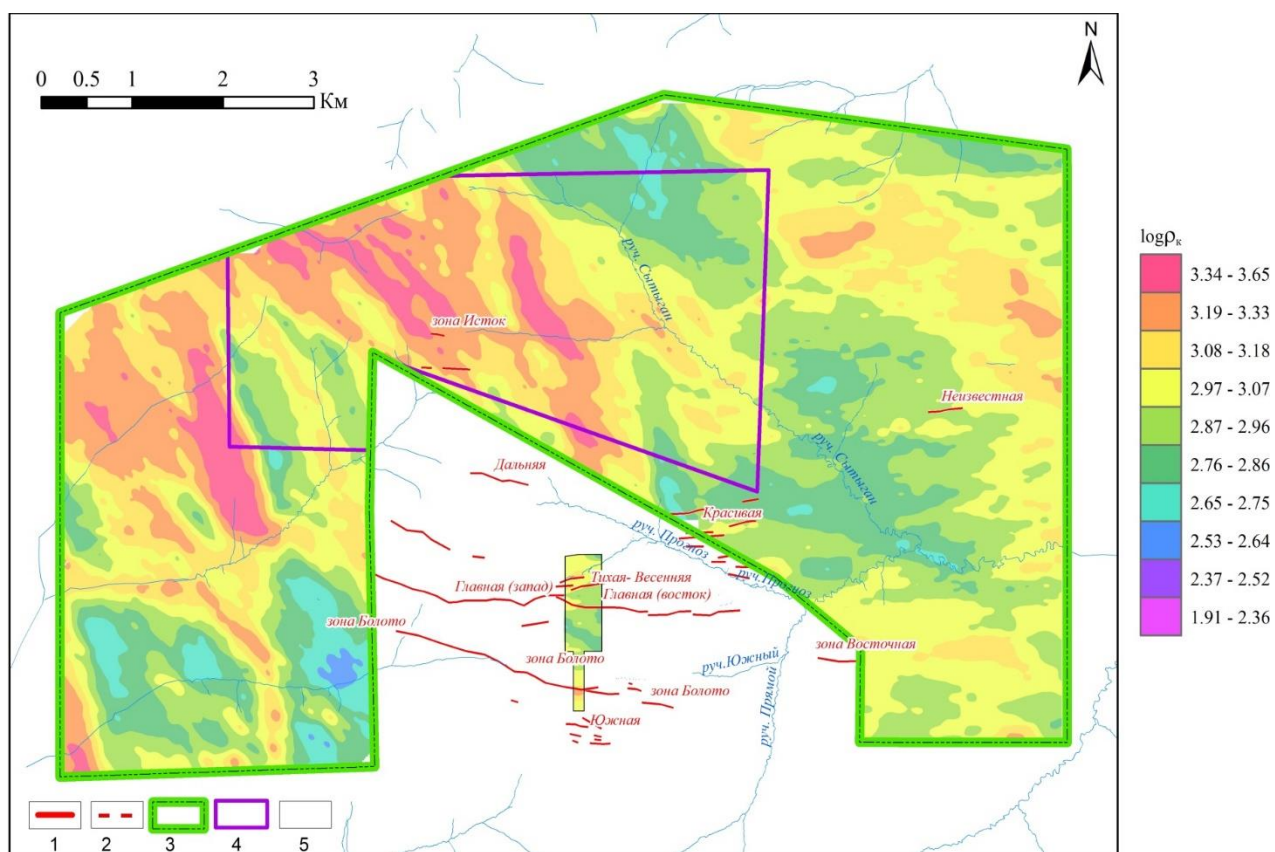


Рисунок 22 Сводная карта изолиний кажущегося сопротивления (ρ_k) по данным съемки СГ-ВП после межпланшетной увязки.

По данным поляризуемости довольно сильно заметно локализованное поле на севере и юге планшета. Данные участки до устранения невязки представляли собой сильно неоднородный изрезанный скачкообразным изменением участок (рис. 4) Значения удельного сопротивления заметно сгладились, что можно объяснить пересчётом на более длинный планшет, а также сильное влияние на расчёт удельного сопротивления рельефа и многолетнемерзлых пород, равно как и глубинные скрытые магматические образования.

8. Заключение

По результатам работы проведены расчёты с применением программ DCIP3D и Surfer для решения всех поставленных задач.

По итогам работы можно сделать ряд выводов:

- Найдена методика, которая может редуцировать невязки в методике ВП-СГ построением дополнительного смоделированного разноса постфактум на компьютере
- Данный метод точен при правильном подборе параметров инверсии среды по полевым данным
- Сглаженные данные позволяют более однозначно интерпретировать геологический источник аномалий

Список литературы

eoas.ubc.ca/. (2020).

Oldenburg, W. D. (2004). *UBC-Geophysical Inversion Facility Department of Earth and Ocean Sciences University of British Columbia, Inversion of 3D DC resistivity and induced polarization data, Vancouver, British Columbia, 2019, pp. 1-15.*

Аникина, Е. Ю. (2000). *Серебро-полиметаллическое месторождение прогноз: минералого-геохимические особенности и генезис автореферат диссертации на соискание ученой степени к.г.-м.н. специальность 04.00.11.*

Дмитриев, В. И. (1990). *Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике.* Москва.

Тарасов, А. (2020). *ОТЧЕТ о результатах обработки площадных электроразведочных работ, выполненных по договору на месторождении Прогноз в 2019 году.*

Тарасов, А. В. (2019). *КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ И РУДОНОСНОСТИ РУДНОГО ПОЛЯ.*

Тихонов, А. Н. (1974). *Методы решения некорректных задач.*